

DER FREIKOLBENLINEARGENERATOR POTENZIALE UND HERAUSFORDERUNGEN

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erforscht einen Freikolbenlineargenerator (FKLG) mit Gasfeder. Erstmals wurde ein solches FKLG-Gesamtsystem in Betrieb genommen und die Machbarkeit des Konzepts nachgewiesen. Das System bietet interessante Potenziale als Range Extender im Pkw-Antriebsstrang.

AUTOREN



DIPL.-ING. FLORIAN KOCK
ist Projektleiter Freikolbenlineargenerator am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



DIPL.-ING. ALEX HERON
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



DR.-ING. FRANK RINDERKNECHT
ist Abteilungsleiter Alternative Energiewandler am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



PROF. DR.-ING. HORST E. FRIEDRICH
ist Direktor des Instituts für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.

KONZEPT DES FREIKOLBEN- LINEARGENERATORS

Der vom DLR realisierte FKLG, ① (a), umfasst die Teilsysteme Verbrennungsteil, Lineargenerator und Gasfeder. Im Verbrennungsteil wird durch innere Verbrennung im Zweitaktverfahren Wärme freigesetzt, sodass die Kolbeneinheit eine lineare Bewegung ausführt. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein weiterer Kolben mit angrenzendem Kompressionsraum, der unbeheizt bleibt und mit dem Arbeitsmedium Luft als Gasfeder wirkt. Die Energieauskopplung aus dem System erfolgt schließlich durch den Lineargenerator. Dieser setzt sich aus dem mit Permanentmagneten besetzten Läufer und gehäusefesten Wicklungen (Stator) zusammen.

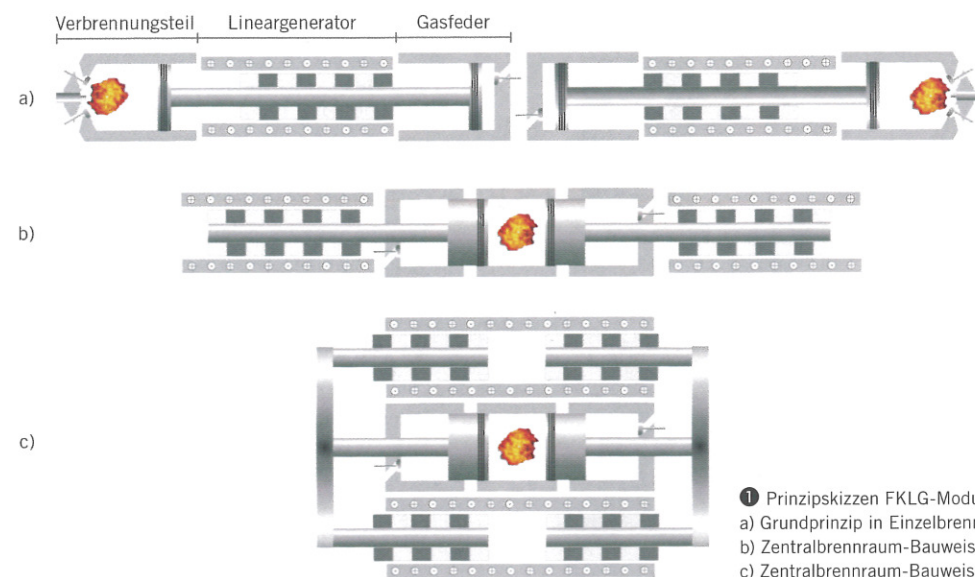
Die beim DLR gewählte Anordnung unterscheidet sich durch die Gasfeder von den meisten Freikolbenprojekten der Vergangenheit [1]. Dieser innovative Ansatz wurde zum einen gewählt, um eine Hubvariabilität darstellen zu können, zum anderen ist das System in dieser Bauweise regelungstechnisch leichter zu beherrschen.

Basierend auf der beschriebenen Anordnung mit einer Kolbeneinheit (bestehend aus Verbrennungs- und Gasfederkolben sowie dem Lineargeneratorläufer) ist für den Fahrzeugeinsatz stets eine weitere spiegelsymmetrische Einheit vorgesehen. Dadurch wird der Ausgleich aller bewegten Massen und somit ein günstiges Geräusch- und Vibrationsverhalten ermöglicht. Diverse Ausführungsformen sind denkbar und grundsätzlich zu unterteilen in die Klasse der Einzelbrennraumsysteme, ① (a), und die der Zentralbrennraumsysteme, ① (b, c).

PRÜFSTANDSAUFBAU UND MACHBARKEITSNACHWEIS

Ein FKLG in Einzelkolben-Bauweise wurde auf den Prüfständen des DLR in Stuttgart als Funktionsdemonstrator aufgebaut. Dieser in ② gezeigte Versuchsaufbau entspricht der Prinzipskizze ① (a) ohne die spiegelsymmetrische Doppelung. Der in Hub und Verdichtungsverhältnis variable Prüfling verfügt über eine Kopfumkehrspülung mithilfe eines elektromagnetischen Ventiltriebs und eine direkte Einspritzung des Ottokraftstoffs.

Das System kann in mehreren Lastpunkten stationär und stabil betrieben



1 Prinzipskizzen FKLK-Modul:
a) Grundprinzip in Einzelbrennraum-Bauweise
b) Zentralbrennraum-Bauweise mit coaxialen Lineargeneratoren
c) Zentralbrennraum-Bauweise mit verzweigten Lineargeneratoren

werden und entwickelt bis zu 8,0 kW elektrische Leistung. Aus dieser Leistung sind im Fahrzeugeinsatz auch einige elektrisch angetriebene Nebenaggregate zu versorgen, deren Funktion im Versuchsaufbau noch durch die Prüfstandsinfrastruktur gegeben ist. Der Vergleich der technischen Daten des Funktionsdemonstrators mit einer potenziellen Range-Extender-Konfiguration in einem Pkw zeigt, dass beim Funktionsdemonstrator der Lineargenerator stark überdimensioniert ist, 3. Die Auslegung mit einer hohen Maximalkraft von 12 kN dient primär als Sicherheits-

reserve im aktuell frühen Entwicklungsstadium. Ein fahrzeugaugliches System wird über einen deutlich kleineren Lineargenerator mit entsprechend reduzierter Läufermasse verfügen. Damit geht eine Steigerung der Systemfrequenz und der spezifischen Leistung einher.

Der Versuchsaufbau dient, wie bereits an der Lineargenerator-Auslegung erkennbar, vorwiegend der sicheren Funktionsdemonstration und dem Konzeptnachweis. Die messbaren Zahlenwerte hinsichtlich Leistungsdichte, Abmessungen oder Wirkungsgrad sind daher nicht als

Hinweis auf die quantitativen Potenziale des FKLK zu verstehen.

VERBRENNUNGSPROZESS UND EMISSIONEN

Der Funktionsdemonstrator arbeitet nach einem ottomotorischen Zweitaktverfahren. Ein aus Sicht der Brennverfahrensentwicklung besser etablierter Viertaktprozess ist im FKLK nur mit zusätzlichem konstruktiven oder energetischen Aufwand darstellbar.

Mit der Kopfumkehrspülung hat der FKLK ein anspruchsvolles Spülkonzept, das ebenso wie der Gemischbildungsvorgang mithilfe von CFD-Simulationen und laseroptischen Untersuchungen entwickelt wurde [2]. Während bei den aktuellen Betriebsfrequenzen bis etwa 20 Hz gute Ergebnisse erzielt werden, wird bei einer deutlichen Erhöhung der Frequenz eine Längsspülung als vorteilhaft eingeschätzt.

Wesentliche Potenziale des FKLK konnten am Prüfstand demonstriert werden. Der Funktionsdemonstrator ermöglicht die Änderung von Hub und Verdichtungsverhältnis im Betrieb. Letzteres bildet die Grundlage für eine gute Flex-Fuel-Tauglichkeit und begünstigt innovative Brennverfahren wie HCCI, welches künftig im Teillastbereich genutzt werden soll. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart konnte die HCCI-Verbrennung an einem Freikolbenprüfstand experimentell umgesetzt werden [3].

Das Emissionsverhalten von Zweitaktmotoren wird üblicherweise durch unverbrannte Kohlenwasserstoffe innerhalb der Kurzschlusspülung geprägt. Diese Problematik wird bereits im heutigen Versuchsaufbau durch die Direkteinspritzung erfolgreich umgangen. Dennoch verbleibt auf dem Gebiet der Emissionen, unter anderem beeinflusst durch Spülung und Gemischbildung, maßgeblicher Entwicklungsbedarf. Dies gilt insbesondere bei Realisierung der Zentralbrennraum-Variante. Da hierbei der Ladungswechsel zwingend durch eine Schlitzsteuerung zu realisieren ist, muss ein Konzept zur Kolbentribologie entwickelt werden, welches ein Abstreifen von Schmierstoff an den Schlitten verhindert.

Ebenfalls besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich des Aufladeorgans, das ein im Zweitaktmotor jederzeit benötigtes Spülgefälle bereitstellen muss. Die im Funktionsdemonstrator genutzte externe Druckluftversorgung steht im Fahrzeug nicht zur Verfügung.

SYSTEMWIRKUNGSGRAD

Im FKLK wandeln mehrere Schritte die chemisch im Kraftstoff gebundene Energie in elektrische Energie um. In einem beispielhaften Betriebspunkt

liegt der kumulierte Wirkungsgrad vom Kraftstoff bis zur elektrischen Leistung P_{AC} am Ausgang des Lineargenerators

Anzeige

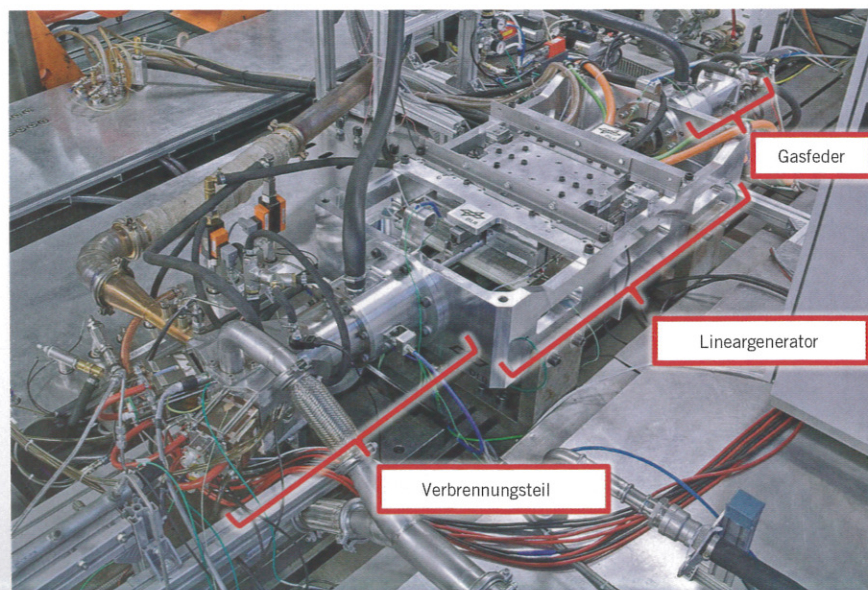


aktuell bei 21,1 %, 4. Die am Funktionsdemonstrator gewonnenen Messwerte sind noch vom frühen Entwicklungsstadium einzelner Bauteile geprägt. Beispiels-

weise ist der erste große energetische Verlust von 31,8 auf 24,0 % vor allem auf starke Reibungseffekte im Linearlager zurückzuführen, während die ebenfalls in diesen Zahlen enthaltenen Gasfederverluste nur einen geringen Teil ausmachen. Die Werte beziehen sich auf einen Betriebspunkt mit $P_{AC} = 8$ kW elektrischer Ausgangsleistung. Davon unabhängig wurden bei Untersuchungen der Teilsysteme einzelne höhere Wirkungsgrade gemessen, im Verbrennungsteil zum Beispiel ein indizierter Wirkungsgrad von bis zu 36 % [4].

Ergänzend zu den Messwerten am Funktionsdemonstrator wurde eine Wirkungsgradprognose für ein beispielhaftes Zentralbrennraumsystem aus Messwerten und Simulationen ermittelt. Dazu wurde ein System auf eine elektrische Nutzleistung von 26 kW ausgelegt. Als Ergebnis der Berechnungen scheint für ein Serienprodukt dieser Leistungsklasse mit entsprechendem Reifegrad ein Wirkungsgrad von 36,6 % realisierbar. Dieser Wert beschreibt die gesamte Wandlungskette aus FKLK, Leistungselektronik und dem Antrieb aller für den Betrieb notwendigen Nebenaggregate, 4.

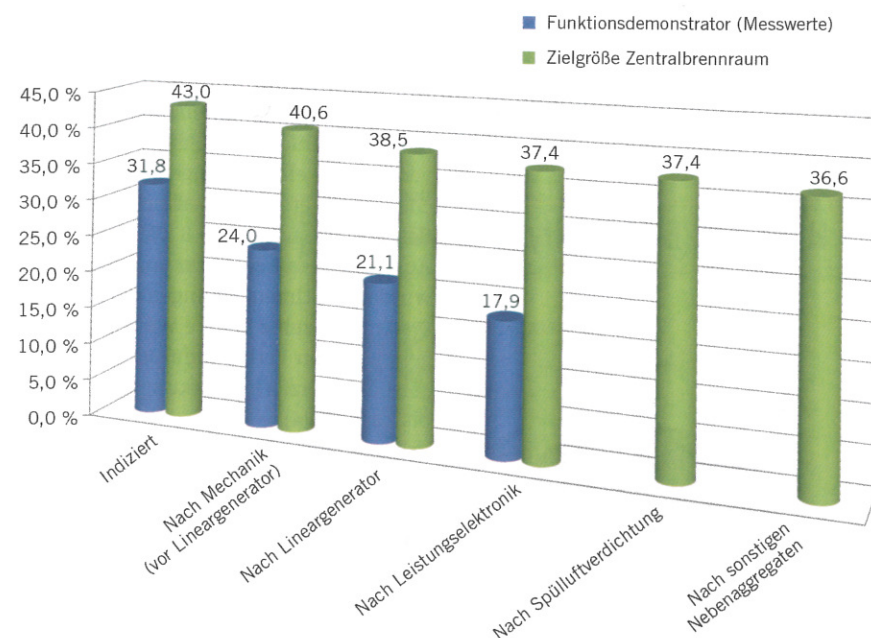
Für naheliegende Vergleiche mit einem Hubkolbenmotor ist zu beachten, dass es im FKLK keine direkte Entsprechung zum häufig betrachteten effektiven



2 Funktionsdemonstrator auf dem Prüfstand bestehend aus Verbrennungsteil, Lineargenerator und Gasfeder

		FUNKTIONSDEMONSTRATOR	FAHRZEUGTAUGLICHES MODUL (BEISPIEL)
Aufbau		1 Brennraum, 1 Lineargenerator, 1 Gasfeder	1 Brennraum (mit 2 Kolben), 2 Lineargeneratoren, 2 Gasfedern
Brennverfahren		Zweitakt Otto	Zweitakt Otto (je nach Betriebspunkt mit HCCI)
Hubraum	[cm ³]	321-481	299
Leistung (indiziert)	[kW]	0-12	0-30
Leistung (elektrisch nach Nebenaggregaten)	[kW]	(einige Nebenaggregate prüfstandsseitig)	0-26
Betriebsfrequenz	[Hz]	16-21	50
Bewegte Masse	[kg]	35,12	2 x 5
Bohrung	[mm]	82,5	63
Hub	[mm]	60-90	2 x 48
Ladedruck	[bar abs.]	1,2-2,0	1,2-2,0
Ladungswechsel		Kopfumkehrspülung über 2 Einlass-, 1 Auslassventil	Längsspülung über Einlass- und Auslassschlitze
Verdichtung Verbrennungsteil		7-11	typisch 9-14 (je nach Kraftstoff)
Einspritzung		Direkteinspritzung, zentraler Mehrlochinjektor	Direkteinspritzung, seitlicher Injektor
Verdichtung Gasfeder		2,5-15	etwa 10
Kraft Lineargenerator	[N]	4000, maximal 12000	3000, maximal 4000
Abmessungen (ohne Nebenaggr.)	[mm]	1940 x 500 x 225	970 x 228 x 143

3 Technische Daten des Funktionsdemonstrators und eines beispielhaften fahrzeugauglichen FKLK-Moduls



4 Wirkungsgrade als Messwerte am Funktionsdemonstrator und Zielgrößen für ein fahrzeugtaugliches Zentralbrennraum-System

Wirkungsgrad η_e (beziehungsweise effektiven spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e) gibt. Es sollte daher stets die Effizienz der gesamten Wandlungskette eines Range-Extender-Aggregats vom Kraftstoff bis zur elektrischen Energie betrachtet werden [5].

Während sich die genannten und im Diagramm dargestellten Wirkungsgradprognosen auf die Vollast (Bestpunkt) beziehen, profitiert der FKLK besonders im Teillastbereich von seinen Variabilitäten hinsichtlich Verdichtungsverhältnis und gegebenenfalls Hub. Im Fahrzeug-

kontext ist daher eine Betriebsstrategie mit mehreren Betriebspunkten des Range Extenders (wie in [6] nahegelegt) in günstiger Weise zu realisieren.

PACKAGE UND GEWICHT

Die wesentliche Besonderheit des FKLK-Packages ist seine flache Bauform. Sie ermöglicht es, das Range-Extender-Modul und gegebenenfalls auch die notwendige Peripherie in Bauräumen wie etwa dem Mitteltunnel oder dem Unterboden unterzubringen, 5. In einem bat-

terieelektrischen Basisfahrzeug kann so der Range Extender kostengünstig als Ausstattungsoption angeboten werden, ohne dass dazu die Fahrzeugarchitektur grundlegend geändert werden müsste. Bei Ausrüstung mit einem Range Extender wird eine kleinere Batterie verwendet und der FKLK im freierwählenden Bauraum platziert.

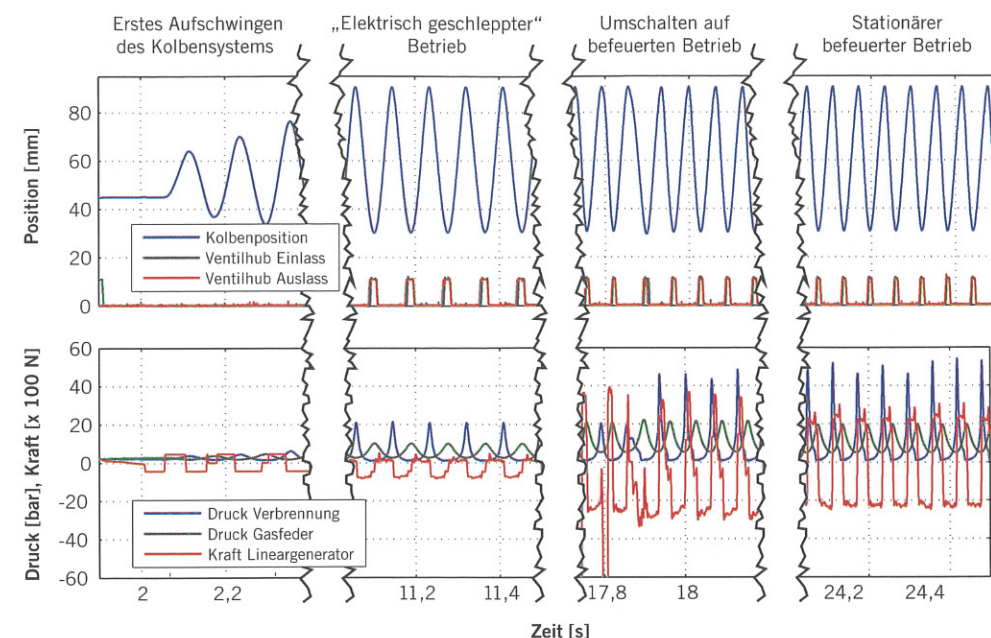
Das erwähnte Beispielsystem erreicht eine Bauhöhe von 143 mm bei einem Flächenbedarf von 970 x 228 mm. Diese beispielhaften Proportionen können den Anforderungen des Fahrzeugs angepasst werden, beispielsweise durch eine alternative, funktional identische Anordnung des Lineargenerators entsprechend 1 (c).

Die Leistungsdichte beziehungsweise das Gewicht des FKLK sind geringfügig besser als die entsprechenden Werte eines kurbelwellenbasierten Range Extenders der gleichen Leistungsklasse. In einer vergleichenden Betrachtung (Zentralbrennraum-FKLK gegenüber Range Extender mit Zweizylinder-Reihenmotor, jeweils Gesamtsystem inklusive Nebenaggregate) auf Bauteilebene konnte ein Verbesserungspotenzial von 5 bis 15 % aufgezeigt werden. Dabei ist in erster Linie der Entfall des Kurbeltriebs ein Vorteil, der durch die etwas schwerere elektrische Maschine nur zum Teil wieder aufgezehrt wird.

STEUERUNG UND REGELUNG

Die Steuerung und Regelung ist eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung eines Freikolbenmotors. Da die Kolbenbewegung nicht durch die Kinematik eines Kurbeltriebs definiert ist, ist in diesem Zusammenhang eine „elektronische Kurbelwelle“ zu realisieren.

Für den Funktionsdemonstrator wurde eine hierarchische Reglerstruktur entworfen und auf einem Rapid-Control-Prototyping-System implementiert [7, 8]. Um die Kolbenbewegung und insbesondere die Lage der Totpunkte zu regeln, wurde ein modellprädiktiver, energiebasierter Ansatz gewählt. Er ermöglicht einen Startvorgang, den stationären Betrieb in unterschiedlichen Betriebspunkten sowie einen guten Störschwingungsausgleich auch bei Zyklusschwankungen bis hin zu Fehlzündungen. Für den Startvorgang wird der Lineargenerator zunächst motorisch betrieben, um dem Kolbensystem Energie zuzuführen, bis nach 18 s die erste Zündung erfolgen kann, 6. Der



6 Kurzdarstellung des Startvorgangs mit motorisch betriebener elektrischer Maschine

Vorgang kann im Rahmen der anstehenden Weiterentwicklungen zeitlich so weit gestrafft werden, dass die Startzeit des FKLK ungefähr der eines heutigen Pkw-Motors entspricht.

Die wesentlichen regelungstechnischen Aspekte in Bezug auf ein Einkolbensystem können als gelöst angesehen werden. Weiterführende Arbeiten sind zum einen hinsichtlich der Synchronisation zweier Kolbeneinheiten erforderlich. Zum anderen stehen viele Parameter für Auslegungs- und Applikationsmaßnahmen zur Verfügung, mit denen die Effizienz und Emissionen des Systems verbessert werden können.

AUSBLICK

Der FKLK ist eine Stromerzeugungseinheit, die für einen Einsatz als Range Extender interessante Potenziale aufweist. Ein Wirkungsgrad von mehr als 36 % für die gesamte Wandlungskette bis zur elektrischen Ausgangsleistung scheint erreichbar. Dieser im Bestpunkt ermittelte Wert wird voraussichtlich auch im Teillastbereich nur geringfügig niedriger liegen, sodass für die fahrzeugseitige Betriebsstrategie ein breiter Lastbereich in günstiger Weise nutzbar ist.

Neben der hohen Effizienz sind die Prognosen hinsichtlich Package und Gewicht günstig. Durch seine Bauhöhe von weniger als 150 mm kann der FKLK in typischen Bauräumen von Batterien unterge-

bracht werden. Bauartbedingt weist der FKLK ein gutes NVH-Verhalten und eine hohe Variabilität auf, die sich unter anderem zur Anpassung an unterschiedliche Kraftstoffqualitäten nutzen lässt.

Durch den Machbarkeitsnachweis des Konzepts wurden elementare Hürden im Bereich der Hard- und Softwareentwicklung überwunden. Darüber hinaus besteht Entwicklungsbedarf in allen technischen Teilsystemen, insbesondere beim Zweitakt-Brennverfahren und damit in Zusammenhang stehenden Systemen. Die bisherigen Ergebnisse bilden eine Basis für weitere Arbeiten, die sich zunehmend von der reinen Forschung hin zu einer stärker industriell geprägten Forschung/Vorentwicklung entwickeln sollen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Mikalsen, R.; Roskilly, A.: A review of free-piston engine history and applications. In: Applied Thermal Engineering 27 (2007), S. 2339-2352
- [2] Haag, J.; Ferrari, C.; Starcke, J. H.; Stöhr, M.; Riedel, U.: Numerical and Experimental Investigation of In-Cylinder Flow in a Loop-Scavenged Two-Stroke Free Piston Engine. SAE International, 2012-32-0114
- [3] Haag, J.; Kock, F.; Chiodi, M.; Mack, O.; Barge, M.; Naumann, C.; Slavinskaya, N.; Heron, A.; Riedel, U.; Ferrari, C.: Development Approach for the Investigation of Homogeneous Charge Compression Ignition in a Free-Piston Engine. 11th International Conference on Engines & Vehicles. Capri, SAE International, 2013
- [4] Ferrari, C.: Entwicklung und Untersuchung eines Freikolbenlineargenerators unter besonderer Berücksichtigung des verbrennungsmotorischen Teilsystems mit Hilfe eines neuartigen vollvariablen Prüfstands. Universität Stuttgart, Dissertation, 2012

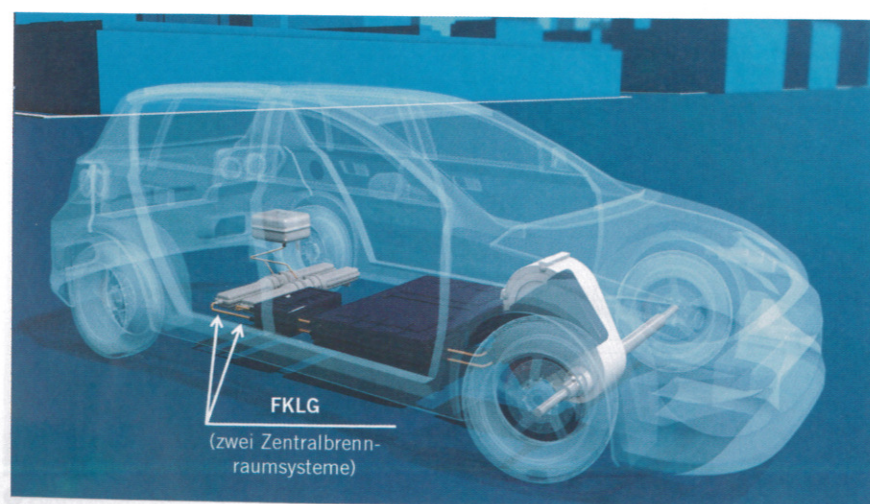
- [5] Grebe, U.; Nitz, L.: Voltec – Das Antriebssystem für Chevrolet Volt und Opel Ampera. In: MTZ 72 (2011), Nr. 5, S. 342-351
- [6] Tschöke, H.: Range Extender – Definition, Anforderungen, Lösungsmöglichkeiten. In: MTZ 73 (2012), Nr. 6, S. 510-515
- [7] Kock, F.; Haag, J.; Friedrich, H. E.: The Free Piston Linear Generator – Development of an Innovative, Compact, Highly Efficient Range-Extender Module. SAE World Congress, 2013
- [8] Kock, F.: Steuerungs- und Regelungsstrategien für das Gesamt- und die Teilsysteme eines Freikolbenmotors am Beispiel des Freikolbenlineargenerators. Universität Stuttgart, Dissertation, 2013
- [9] Gräf, M.; Nedele, M.; Gräf, J.: Freikolben-Verbrennungsvorrichtung mit elektrischem Lineartrieb. Patent DE 102 19 549 B4, 2004

DANKE

Die beschriebenen Ergebnisse wurden durch die Arbeiten der Kollegen und Kooperationspartner während der gesamten bisherigen Projektlaufzeit ermöglicht. Wesentliche Grundlagen gehen dabei insbesondere auf [9] zurück.

DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/MTZ

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com



5 FKLK im Unterboden als Teil des Antriebsstrangs im Pkw